

# DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA HIERÁRQUICO DE CLASSIFICAÇÃO COM APLICAÇÃO BASEADA EM ABORDAGEM FUZZY<sup>1</sup>

*Development of a hierarchical classification system with application based on fuzzy approach.*

FERNANDA DE ALMEIDA PRADO  
MARIA DE LOURDES BUENO TRINDADE GALO

Universidade Estadual Paulista – UNESP  
Faculdade de Ciências e Tecnologia – FCT  
Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas  
Departamento de Cartografia  
Rua Roberto Simonsen 305, CEP 19060-900, Presidente Prudente, SP  
prado\_fernanda@yahoo.com.br; mlourdes@fct.unesp.br

## RESUMO

Os mapeamentos da cobertura da terra constituem importantes ferramentas para o planejamento regional. Entretanto, os atuais mapeamentos atendem a propósitos muito específicos, sendo limitados na sua capacidade de definir a ampla variedade de tipos existentes de cobertura da terra. Nesse contexto, este trabalho objetiva desenvolver um sistema hierárquico de classificação, amplo e abrangente, para o mapeamento da cobertura da terra em escala regional, que contribua para uma futura padronização de classes. Além disso, pretende-se testar esse sistema para um estudo de caso que contemple o uso de uma técnica de classificação baseada em abordagem *fuzzy*, que se tem mostrado mais adequada que as abordagens convencionais. Para tanto, foi proposto um sistema hierárquico de classificação com três níveis de detalhamento e foi definido um estudo de caso com a especificação da área de teste e do projeto de classificação. A partir disso, foi realizado o georreferenciamento de uma imagem TM/Landsat-5, que abrange a área de teste, e foi aplicada uma abordagem de classificação *fuzzy*, a partir da qual foram geradas

---

<sup>1</sup> Uma versão preliminar deste artigo foi publicada nos Anais do II SIMGEO.

imagens de probabilidade para as classes mapeadas e uma imagem de incerteza. Finalmente, foi produzida uma saída convencional, que representa o mapeamento temático da área de teste.

**Palavras-chave:** sensoriamento remoto; sistema hierárquico de classificação; cobertura da terra.

### ABSTRACT

Land cover mappings represent important tools for the regional planning. However, the current mappings are related to very specific purposes and, consequently, they are limited in their capacity to define the wide variety of existing types of land cover. In that context, this paper aims at developing a wide and including hierarchical classification system for land cover mapping in regional scale, which should contribute for a future standardization of classes. Besides, it is intended to test that system for a study case that contemplates the use of a classification method based on fuzzy approach, which has shown to be more appropriate than conventional approaches. Therefore, it was proposed a hierarchical classification system with three detailing levels and a study case was defined with the specification of the test area and of the classification project. Then, the georeferencing of a TM/Landsat-5 image that comprises the test area was carried out. Later, it was applied a fuzzy classification approach in the TM/Landsat-5 image, starting from images of probability for the mapped classes and an uncertainty image were generated. Finally, it was produced a conventional output that represents the thematic mapping of the test area.

**Keywords:** remote sensing; hierarchical classification system; land cover.

## 1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, os sistemas de sensoriamento remoto têm sido amplamente utilizados no mapeamento da cobertura terrestre e no monitoramento dos recursos naturais. Isto se deve ao fato de que os dados obtidos a partir de satélites propiciam coberturas repetitivas da superfície terrestre em intervalos relativamente curtos. Destaca-se também a possibilidade de processamento rápido desses dados através de técnicas de análise associadas a sistemas computacionais.

Dessa forma, os dados de sensores remotos devem ser analisados para que sejam extraídas informações necessárias ao planejamento, manejo e monitoramento dos recursos. Essa análise torna-se viável pelo fato dos alvos da superfície terrestre apresentarem comportamentos específicos ao longo do espectro eletromagnético, que podem, portanto, ser usados para identificá-los.

A extração de informações a partir desses dados orbitais implica na necessidade de uma forma de representação que seja assimilável pelo usuário. Para tanto, convencionalmente, são utilizados mapas temáticos, onde os alvos terrestres, detectados pelos sensores remotos, são caracterizados e associados a classes (ou categorias) temáticas que definem o uso e a cobertura da terra. Esses mapeamentos, gerados principalmente através de técnicas de classificação multiespectral, têm se

tornado cada vez mais freqüentes devido a grande quantidade de imagens disponíveis geradas por satélites com as mais variadas resoluções.

Dentre as técnicas de classificação multiespectral, as convencionais por *pixel* e por regiões ainda têm sido amplamente utilizadas, principalmente por usuários não especialistas. Contudo, outras técnicas menos usuais têm se mostrado mais satisfatórias, como classificações baseadas em abordagem *fuzzy*. Diferentes pesquisadores (WANG, 1990; FOODY, 1999; ZHANG; STUART, 2001) têm afirmado que a teoria de conjuntos *fuzzy* pode contribuir para uma melhor representação dos fenômenos geográficos, visto que esta permite caracterizar a transição entre tipos de uso e cobertura terrestre e lidar com a ocorrência de *pixels* mistos, muito freqüentes, principalmente, em imagens de resolução espacial superior a metros ou dezena de metros.

Independente da técnica utilizada, classificar envolve a definição dos tipos de classes de interesse e de seus critérios, os quais devem ser claros e objetivos. Contudo, o que se vê, atualmente, é uma grande quantidade de mapeamentos temáticos com classes inapropriadas para propósitos particulares, ou com terminologia ambígua, voltados a finalidades específicas, ou com informação, muitas vezes, obsoleta (DI GREGORIO, 2004).

Normalmente, cada usuário define sua própria legenda da classificação, contendo as classes necessárias a sua aplicação. Assim, ainda que a nomenclatura dessas classes seja similar, em alguns casos, nem sempre os critérios que as definem são os mesmos. Como consequência, torna-se inviável a reprodução e/ou atualização desses mapeamentos por parte de outros usuários, visto que não se conhece claramente o significado das classes. Do mesmo modo, também fica impossibilitado o intercâmbio de informações entre diferentes planejadores, que atuam a nível estadual, regional ou municipal, se as classes não forem compatíveis.

Apesar da necessidade clara de uma padronização de classes, não apenas da nomenclatura, mas também dos critérios de definição, nenhum dos sistemas de classificação atuais é internacionalmente aceito. Em geral, o que se encontra na literatura são classificações de vegetação ou sistemas relacionados à descrição de alvos específicos (por exemplo, áreas agrícolas ou fisionomias vegetacionais), os quais são, portanto, limitados na sua capacidade de representar toda a variedade de tipos possíveis de cobertura da terra (DI GREGORIO, 2004).

Uma das principais contribuições encontrada na literatura, no sentido de um sistema amplo e abrangente, é o trabalho elaborado por Anderson et al. (1976), cujos autores desenvolveram, na década de 70, o sistema utilizado pelo Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS) para a geração de mapas do território americano. Desde então, vários sistemas foram propostos, contudo, ainda assim, independentes e específicos para suas regiões e para um determinado propósito.

Outro sistema que constitui uma referência teórica é o proposto pelo Projeto CORINE (Coordenação de Informação do Ambiente) *Land Cover*, definido na década de 80 para o mapeamento de terras européias. Esse sistema de classificação

possui uma hierarquia de classes que pode ser útil a diferentes projetos de mapeamento, atendendo à demanda de diferentes usuários.

No Brasil, a iniciativa de definição de um sistema de classificação nacional foi do IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), através do Projeto de Uso da Terra, estabelecido no final da década de 90 com vistas a sistematizar as informações sobre o meio ambiente.

Dessa forma, dentre muitos sistemas de classificação existentes, cada qual proposto por uma entidade distinta e voltado a uma finalidade específica, o sistema utilizado pelo USGS continua sendo a principal referência teórica, acompanhado, desde épocas mais recentes, pelo sistema europeu do Projeto CORINE *Land Cover*. Ambos privilegiam a caracterização da cobertura da terra. Por outro lado, a proposição teórica brasileira, recém-melhorada e atualizada, tem como foco principal a descrição do uso da terra.

Nesse contexto, o objetivo do presente trabalho é desenvolver um sistema hierárquico de classificação para o mapeamento da cobertura da terra em escala regional, que contribua para uma futura padronização da nomenclatura e dos critérios de descrição das classes observadas no território brasileiro. O referido sistema foi testado em um estudo de caso que contempla o uso de uma técnica de classificação baseada em abordagem *fuzzy*.

## 2. LÓGICA FUZZY E CLASSIFICAÇÃO DE IMAGENS MULTIESPEC-TRAIS

A matemática e a lógica tradicional (ou *booleana*) já conseguiram mapear satisfatoriamente um incontável número de processos de cálculo e decisão. Porém, muitas experiências humanas necessitam de um enfoque mais abrangente do que a simples associação de falso ou verdadeiro, sim ou não, certo ou errado (LIMA JR., 2002).

Diante disso, a teoria *fuzzy* (ou lógica nebulosa) surge como uma alternativa para representar modelos de raciocínio impreciso, necessários à tomada de decisões racionais em ambientes de incertezas e imprecisões. Essa teoria foi proposta por Lotfi Zadeh, em 1965, que a definiu como a parte da lógica matemática dedicada ao raciocínio incerto ou aproximado, utilizada para caracterizar classes que, por diversas razões, não possuem limites rígidos entre si.

Na lógica *booleana*, um conjunto  $A$  pertencente a um domínio  $X$  pode ser representado por uma função característica  $A(x)$ , cujos valores podem ser igual a 1, se  $x \in X$ , ou igual a 0, se  $x \notin X$ . Essa estrutura restritiva é ideal para conjuntos com limites bem definidos pois, para qualquer objeto que pertença ao domínio  $X$ , pode-se determinar com exatidão se o mesmo pertence ou não ao conjunto  $A$  (ZADEH, 1965). Por outro lado, um conjunto *fuzzy* é caracterizado por uma função de pertinência que mapeia os elementos de um domínio  $X$  para um número real em  $[0,1]$  ou, formalmente,  $A: X \rightarrow [0,1]$ . Dessa forma, um conjunto

*fuzzy* apresenta-se como um conjunto de pares ordenados, em que o primeiro elemento é  $x \in X$ , e o segundo,  $f_A(x)$ , é o grau de pertinência (ou a função de pertinência) de  $x$  em  $A$ , que mapeia  $x$  no intervalo  $[0,1]$ , ou seja,  $A = \left\{ (x, f_A(x)) \mid x \in X \right\}$  (ZADEH, 1965).

Em classificação de imagens multiespectrais, normalmente, a informação de interesse é extraída por meio de técnicas de classificação convencionais, cuja decisão é baseada na lógica *booleana* e o *pixel* é atribuído a uma única classe temática, desconsiderando a existência de qualquer proporção de contribuição de outras classes para esse *pixel*. Essas técnicas de representação têm dificuldades para lidar com fenômenos que não podem ser descritos por uma pertinência total a um único conjunto, como misturas entre tipos de cobertura, que ocorrem freqüentemente, implicando em perda substancial de informação espectral útil (MASELLI; RODOLFI; CONESE, 1996). Por exemplo, tipos adjacentes de cobertura da terra raramente são separados por limites nitidamente definidos, mas sim por zonas de transição, nas quais não existe predominância de qualquer tipo de cobertura. Enquanto nessas zonas de transição (isto é, nesse contínuo) entre classes os *pixels* serão compostos por proporções variáveis de diferentes classes, caracterizando *pixels* mistos, além desse contínuo, os *pixels* poderão ser “puros” e incluir apenas espécies associadas a uma única classe (ZHANG; STUART, 2001).

A proporção de *pixels* mistos em uma imagem geralmente aumenta com a diminuição da resolução espacial do sensor. Para dados de resolução espacial métrica e quilométrica, usados em mapeamentos nas escalas regional e global, onde o sensoriamento remoto é a principal fonte de dados em mapeamentos temáticos, *pixels* mistos podem dominar as imagens (FOODY et al., 1997). Assim, para lidar com a ocorrência de *pixels* mistos, as classes podem ser representadas como conjuntos *fuzzy*, atribuindo graus de pertinência aos *pixels* para indicar a extensão com que estes pertencem a cada classe, o que permite uma melhor representação dos fenômenos geográficos.

A partição *fuzzy* do espaço multiespectral pode ser expressa na forma de uma matriz de partição *fuzzy* (WANG, 1990):

$$\begin{bmatrix} f_{\omega_1}(\bar{x}_1) & f_{\omega_1}(\bar{x}_2) & \cdots & f_{\omega_1}(\bar{x}_n) \\ f_{\omega_2}(\bar{x}_1) & f_{\omega_2}(\bar{x}_2) & \cdots & f_{\omega_2}(\bar{x}_n) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f_{\omega_m}(\bar{x}_1) & f_{\omega_m}(\bar{x}_2) & \cdots & f_{\omega_m}(\bar{x}_n) \end{bmatrix}; \quad (1)$$

onde:  $\omega_1, \dots, \omega_m$  representam as  $m$  classes espectrais;  $\bar{x}_1, \dots, \bar{x}_n$  são  $n$  os *pixels*; e  $f_{\omega_1}, \dots, f_{\omega_m}$  são as funções de pertinência para as classes.

Existem várias maneiras de derivar uma classificação *fuzzy*, dentre as quais se pode destacar a classificação relativa bayesiana, na qual são consideradas média e matriz de variância e covariância ponderadas, cujos pesos são graus de pertinência *fuzzy* estimados a partir de dados de treinamento obtidos para as classes (EASTMAN; LANEY, 2002). Assim, segundo Wang (1990), a média *fuzzy* ( $\bar{m}_c^*$ ) e a matriz de covariância *fuzzy* ( $\Sigma_c^*$ ) são calculadas, respectivamente, por:

$$\bar{m}_c^* = \frac{\sum_{i=1}^n f_c(\bar{x}_i) \cdot \bar{x}_i}{\sum_{i=1}^n f_c(\bar{x}_i)} \quad \text{e} \quad \Sigma_c^* = \frac{\sum_{i=1}^n f_c(\bar{x}_i) (\bar{x}_i - \bar{m}_c^*) (\bar{x}_i - \bar{m}_c^*)^T}{\sum_{i=1}^n f_c(\bar{x}_i)}; \quad (2)$$

onde:  $n$  é o número total de *pixels* de treinamento;  $\bar{x}_i$  é o vetor de atributos do *pixel* de amostra; e  $f_c$  é a função de pertinência da classe  $c$  (a proporção de classe de cobertura  $c$  na amostra de treinamento).

Uma vez que as estatísticas de treinamento são desenvolvidas, a classificação pode ser realizada. A pertinência a uma classe é definida com base na lógica da classificação de Máxima Verossimilhança, mas usando a média e a matriz de covariância *fuzzy* substituindo a média e a matriz de covariância convencionais, isto é:

$$f_c(\bar{x}) = \frac{P^*(\bar{x}|\omega_c)}{\sum_{i=1}^m P^*(\bar{x}|\omega_i)}; \quad (3)$$

onde:  $P^*(\bar{x}|\omega_i)$  é a função densidade de probabilidade normal para a classe  $i$ , dada por:

$$P^*(\bar{x}|\omega_i) = \frac{1}{(2\pi)^{N/2} |\Sigma_i^*|^{1/2}} e^{\left[ -\frac{1}{2} (\bar{x} - \bar{m}_i^*)^T \Sigma_i^{*-1} (\bar{x} - \bar{m}_i^*) \right]}; \quad (4)$$

onde:  $N$  é o número de bandas espectrais utilizadas (WANG, 1990).

A partir das medidas de probabilidade associadas a cada *pixel*, pode-se estimar a incerteza que um classificador tem ao ser “forçado” a atribuir um *pixel* a uma única classe de cobertura, desconsiderando a resposta gerada pela mistura de duas ou mais classes. Essa incerteza é obtida por:

$$Inc(\bar{x}) = 1 - P^*(\bar{x}|\omega_i). \quad (5)$$

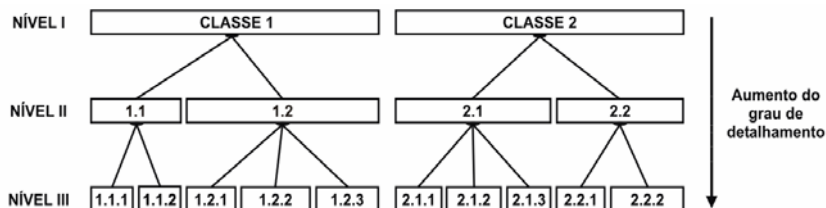
### 3. SISTEMAS DE CLASSIFICAÇÃO DE USO E COBERTURA DA TERRA

O termo “cobertura da terra” refere-se à cobertura (bio)física observada sobre a superfície terrestre, isto é, àquilo que se pode extrair diretamente de imagens orbitais ou fotografias aéreas. Por outro lado, o “uso da terra” pode ser caracterizado pelas atividades desenvolvidas pelas pessoas que ocupam um tipo de cobertura específico e interagem para mantê-lo ou modificá-lo. Assim, por exemplo, as áreas de recreação existentes nas cidades são usos da terra que podem ser aplicados a diferentes tipos de cobertura, desde áreas verdes até áreas construídas.

Com a grande diversidade de tipos de cobertura existentes, surgiu a necessidade de descrevê-los adequadamente e classificá-los com vistas ao desenvolvimento de sistemas que buscam padronizar e compatibilizar dados para mapeamento, análise e monitoramento de extensas áreas, de maneira prática e consistente (DI GREGORIO, 2004).

Um sistema de classificação é uma estrutura de representação de classes temáticas em níveis de detalhamento. A maioria dos sistemas é hierarquicamente estruturada, iniciando com as classes mais amplas e, a partir dessas, realizando uma subdivisão sistemática. Assim, as classes nos níveis superiores e menos detalhados podem ser divididas em subclasses, nos níveis inferiores e de maior detalhamento. Na Figura 1 é apresentado um sistema hierárquico com três níveis de detalhamento, composto de duas classes no nível I, quatro subclasses no nível II e dez subclasses no nível III.

Figura 1 - Sistema hierárquico de classificação com três níveis de detalhamento.



A estrutura das classes temáticas, portanto, é especificada pelo sistema de classificação. Esse sistema deve estar previsto dentro de um projeto (ou esquema) de classificação, o qual deve contemplar a definição das classes temáticas necessárias à aplicação específica; os dados e técnicas de classificação mais adequadas; e o método de análise da qualidade temática da informação representada.

Conforme Congalton e Green (1999), o projeto de classificação contempla dois componentes críticos: (1) um conjunto de rótulos, isto é, dos nomes das classes estabelecidas para o sistema de classificação; e (2) um conjunto de regras que caracterizem os diferentes tipos de ocorrências a serem mapeados. Sem um claro

conjunto de regras, a atribuição dos rótulos aos tipos de cobertura torna-se arbitrária e sem consistência. Além disso, o nível de detalhamento (isto é, número e complexidade das classes) estabelecido no projeto deve ser direcionado pelo uso que será dado à informação representada no mapa e pelos atributos da terra que são discerníveis nos dados utilizados na sua elaboração.

### 3.1 Programas de Mapeamento em Escala Regional

Dentre os sistemas de classificação apresentados pelos diversos programas de mapeamento existentes, é dado destaque às proposições feitas por Anderson et al. (1976) e pelo Programa CORINE *Land Cover*. A nível nacional, as principais referências consideradas são o Projeto de Uso da Terra elaborado pelo IBGE e o Manual Técnico da Vegetação Brasileira, também proposto pela mesma instituição. Esses quatro sistemas foram selecionados pelos seguintes fatores: (1) são reconhecidos na literatura clássica; (2) a maior parte destes propõe uma hierarquização na representação das classes; e (3) são amplos, isto é, abrangem uma variedade de tipos de uso e cobertura da terra.

O sistema proposto por Anderson et al. (1976) foi apresentado e publicado no Documento Técnico 964 do Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS), sendo utilizado por esse órgão para mapear o uso e a cobertura da terra dos Estados Unidos nas escalas 1:250.000 e 1:100.000. Esse sistema inclui dois níveis de detalhamento que fornecem informação em uma base de âmbito nacional, interestadual ou estadual. Corresponde a um sistema propositalmente aberto, permitindo flexibilidade para o desenvolvimento posterior de uma classificação mais detalhada, nos níveis III e IV, apropriada para atividades de planejamento e gerenciamento regionais, locais ou nacionais (ANDERSON et al., 1976).

O sistema de classificação do programa CORINE *Land Cover* foi implementado pela Agência Ambiental Européia (EEA), no período de 1985 a 1990, e surgiu da necessidade de se ter uma base de informações ambientais de todo o território europeu, de forma homogênea e suscetível a atualizações periódicas. A nomenclatura desse sistema é hierarquizada em três níveis: o primeiro compreende as maiores classes de cobertura da terra para o planeta; o segundo é utilizado para escalas geográficas de 1:1.000.000 a 1:500.000; e o terceiro é voltado para projetos na escala 1:100.000 (EEA, 1995).

O Projeto de Uso da Terra do IBGE surgiu da necessidade de um referencial nacional para o estabelecimento de normas e critérios a serem utilizados na elaboração de mapeamento de uso e cobertura da terra (IBGE, 1999). O sistema de classificação, que se encontra na sua segunda edição (IBGE, 2006), foi definido em três níveis hierárquicos, com classes e subclasses, procurando formar legendas com o máximo de significado e o mínimo de níveis.

Finalmente, o Manual Técnico da Vegetação Brasileira foi proposto pelo IBGE, na década de 90, após diversos sistemas de classificação de vegetação terem sido apresentados em diversas épocas. Conforme esse Manual, a vegetação



brasileira é subdivida em quatro agrupamentos: (i) Regiões Fitoecológicas; (ii) Formações Pioneiras; (iii) Refúgios Vegetacionais; e (iv) faixas de Tensão Ecológica dos contatos entre duas ou mais Regiões Fitoecológicas; onde cada qual apresenta suas respectivas subdivisões, em função das características das regiões nas quais se encontram (IBGE, 1992b).

#### **4. PROPOSTA DO SISTEMA HIERÁRQUICO DE CLASSIFICAÇÃO**

Propor um sistema hierárquico de classificação não é uma tarefa trivial, visto que existe uma grande variedade de legendas, ou mesmo de sistemas de classificação com classes pouco compatíveis entre si. Ainda que a nomenclatura das classes seja similar, em alguns casos, nem sempre as definições dos critérios para as classes são únicas. Contudo, apesar da dificuldade, ao estabelecer o sistema de classificação apresentado neste trabalho, buscou-se contribuir para a definição de um sistema padrão que possa ser utilizado como referência para aqueles que pretendem realizar mapeamentos da cobertura da terra. Esse sistema prioriza a cobertura observada no território brasileiro podendo também ser aplicado ou adaptado para outras regiões de cobertura similar.

Para o estabelecimento do sistema hierárquico foram tomadas como principais referências os quatro sistemas destacados neste trabalho, sendo um americano, um europeu e dois brasileiros. Além disso, outros sistemas de classificação internacionais também foram consultados, dentre os quais se citam os elaborados por: FAO (DI GREGORIO, 2004); Ministério de Recursos Naturais de Ontario, Canadá (OMNR, 1999); Projeto de Uso e Cobertura da Terra do Arkansas, EUA (GORHAM, 1999); sistema de classificação do Projeto LUCAS 2006 (*Land Use/Cover Area Frame Statistical Survey* – Levantamento estatístico do quadro de área de uso e de cobertura da terra), estabelecido para países europeus (EC, 2006); e Sistema de Uso e Cobertura da Terra de Michigan, EUA (MDNR, 2001). Desse modo, uma ampla diversidade de classes pôde ser analisada e, a partir disso, foram realizadas as adequações e proposições necessárias para aplicações de mapeamentos a nível nacional.

Esse sistema hierárquico foi definido em três níveis de detalhamento (Tabela 1), visando, principalmente, mapeamentos de cobertura da terra a partir de imagens orbitais, mas que também podem ser realizados usando fotografias aéreas, levantamentos de campo ou pela combinação de fontes de dados. O nível I é semelhante à proposição do Projeto CORINE *Land Cover*, com algumas modificações necessárias, abrangendo as maiores classes de cobertura da terra para o planeta e, assim, totalizando seis categorias. O nível II foi proposto com base nos vários sistemas consultados e foram feitas adaptações de forma a melhor caracterizar a cobertura da terra e os ecossistemas existentes no Brasil, sendo composto por treze subclasses. O nível III foi definido com trinta e sete subclasses, considerando principalmente o sistema proposto pelo Projeto CORINE *Land Cover*

e também o Manual Técnico da Vegetação Brasileira, contudo, propondo novas subdivisões para facilitar a caracterização da cobertura vegetal.

Tabela 1 - Sistema hierárquico de classificação para o mapeamento da cobertura da terra em escala regional.

<b>NÍVEL I</b>	<b>NÍVEL II</b>	<b>NÍVEL II</b>
1. Superfície construída	1.1 Edificação urbana / rural	1.1.1 Edificação urbana / rural
	1.2 Malha viária / ferroviária	1.2.1 Malha viária 1.2.2 Malha ferroviária
2. Área agrosilvopastoril	2.1 Cultura agrícola	2.1.1 Cultura agrícola permanente*
		2.1.2 Cultura agrícola temporária*
	2.1.3 Solo preparado / Cultura recém-colhida	
2.2 Pastagem	2.2.1 Pastagem cultivada 2.2.2 Pastagem degradada	
2.3 Reflorestamento / Florestamento	2.3.1 Reflorestamento/ Florestamento com Pinus 2.3.2 Reflorestamento / Florestamento com Eucaliptos 2.3.3 Reflorestamento / Florestamento com outras espécies**	
3. Área úmida	3.1 Área úmida continental	3.1.1 Pântano 3.1.2 Planície alagável 3.1.3 Palmeiral
	3.2 Área úmida litorânea	3.2.1 Campo salino 3.2.2 Manguezal 3.2.3 Restinga 3.2.4 Salina
4. Água	4.1 Água continental	4.1.1 Curso d'água 4.1.2 Lago / Lagoa 4.1.3 Reservatório
	4.2 Água marinha	4.2.1 Baía / Estuário 4.2.2 Laguna costeira 4.2.3 Mar / Oceano

5. Formação vegetal	5.1 Formação florestal	5.1.1 Formação florestal densa 5.1.2 Formação florestal aberta 5.1.3 Formação florestal mista 5.1.4 Formação florestal decidual 5.1.5 Formação florestal semidecidual
	5.2 Formação savânica	5.2.1 Formação savânica arbórea 5.2.2 Formação savânica arbustiva 5.2.3 Formação savânica herbácea
	5.2 Formação campestre	5.2.1 Formação campestre arbustiva 5.2.2 Formação campestre herbácea
6. Área sem cobertura vegetal	6.1 Área sem cobertura vegetal	6.1.1 Solo exposto 6.1.2 Área degradada 6.1.3 Praia / Duna / Areal

\* O nome da classe pode ser mantido ou substituído pelo(s) tipo(s) de cultura(s) em questão.

\*\* O nome da classe é estabelecido em função da espécie considerada.

Observa-se que o nível I está relacionado com uma escala global (exploratória) e os níveis II e III constituem a escala regional propriamente dita, de reconhecimento e semi-detahle, respectivamente. Trata-se de um sistema amplo, com um grande conjunto de classes, que pode suprir a necessidade de uma variedade de usuários, e que é aplicável a diferentes escalas e em diferentes níveis de detalhamento. Dessa forma, o sistema proposto abrange níveis mais generalizados e de menor detalhamento, a partir dos quais, cada usuário pode detalhar os níveis IV e V de forma a atender as suas necessidades específicas de mapeamento. Outra alternativa, caso seja necessário, é fazer adaptações das classes propostas nos níveis II e III do sistema para adequar algumas dessas categorias a fins muito específicos de determinados usuários, ou mesmo introduzir novas classes que não tenham sido contempladas pelo sistema.

A concepção de um sistema de classificação hierarquizado em níveis de detalhamento utiliza o mesmo princípio da generalização cartográfica, que consiste no processo de reduzir o nível de detalhe de um mapa como consequência da

redução de sua escala. Assim, quanto mais generalizado for o mapa e, conseqüentemente, menor for a escala de mapeamento, maior será a simplificação no processo de extração e representação das informações. Por exemplo, as classes temáticas propostas no nível III do sistema, que é o mais especializado, quando são caracterizadas a partir do nível II, que é mais generalizado, fazem com que seja necessário simplificar o mapeamento temático realizando a fusão de *pixels*, que anteriormente eram atribuídos a classes distintas, em uma única classe.

Para extrair as informações de interesse em cada nível de detalhamento, recomendações podem ser feitas quanto às características dos dados a serem utilizados, quando se trata de um mapeamento realizado a partir de imagens de sensoriamento remoto. Essas recomendações servem como uma orientação, devendo, cada analista, decidir pelo tipo de dado que melhor se adéqua a cada projeto de classificação. Assim, pode-se dizer que:

- considerando o nível I, imagens com resolução espacial em torno de 80 m (ex.: MSS/Landsat) são suficientes. Outra alternativa é o uso de imagens TM/Landsat-5 de 30 m, ou CCD/CBERS (CBERS-2 ou CBERS-2B) de 20 m;
- para o nível II, imagens TM/Landsat-5 ou CCD/CBERS são satisfatórias; e
- para o nível III, novamente pode-se considerar imagens TM/Landsat-5 ou CCD/CBERS, ou ainda imagens pancromáticas HRS/SPOT-5 de 10 m e multiespectrais HRG/SPOT-5 de 5 m.

Recomendações também podem ser feitas com relação à escala de mapeamento utilizada para a representação das informações temáticas extraídas. Assim:

- o nível I pode ser indicado para o mapeamento em escalas entre 1:1.000.000 – 1:500.000;
- o nível II, para o mapeamento em escalas entre 1:250.000 – 1:100.000; e
- o nível III, para o mapeamento em escalas maiores que 1:100.000.

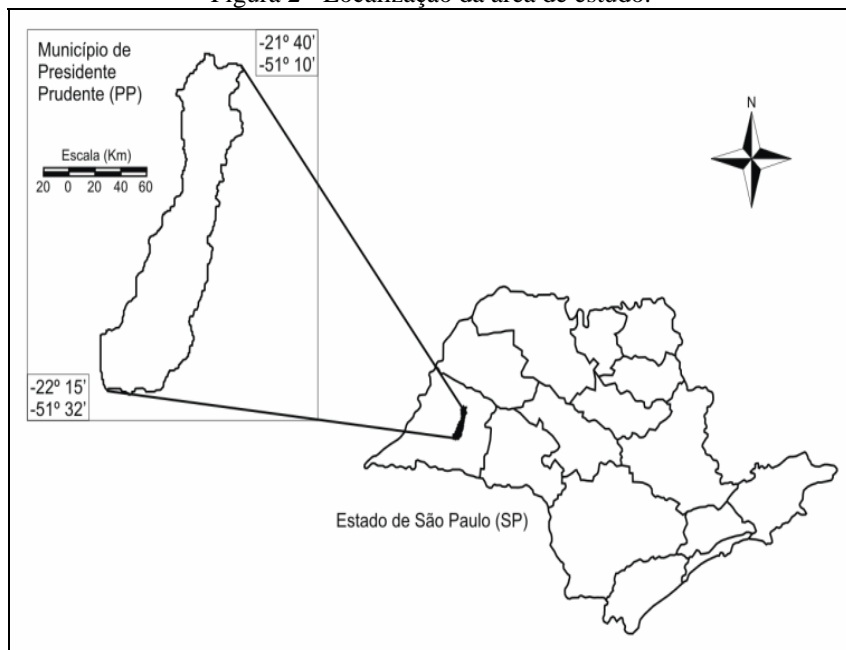
Prado (2009) apresenta a descrição dos critérios utilizados para cada classe de cobertura, considerando o nível III de detalhamento, de modo que qualquer analista responsável pela execução de um mapeamento temático e/ou usuário do produto gerado possam compreender e caracterizar igualmente o significado das classes propostas no sistema.

## **5. APLICAÇÃO DO SISTEMA DE CLASSIFICAÇÃO**

### **5.1 Seleção da Área de Estudo**

A área de estudo adotada neste trabalho contempla o município de Presidente Prudente, o qual possui uma extensão territorial de 562 km<sup>2</sup> e uma população superior a 200.000 habitantes. Esse município está localizado no Estado de São Paulo, entre as seguintes coordenadas geográficas: 21° 40' a 22° 15' de latitude Sul e 51° 10' a 51° 32' de longitude Oeste, conforme mostra a Figura 2.

Figura 2 - Localização da área de estudo.



A cidade de Presidente Prudente é a capital da décima região administrativa do Estado de São Paulo, constituindo um importante pólo administrativo e atrativo para os habitantes das cidades da região e vizinhas, cujo município necessita de um planejamento adequado e que favoreça o seu desenvolvimento.

## 5.2 Especificação do Projeto de Classificação

O projeto de classificação é relacionado à aplicação específica de interesse de cada usuário e deve apresentar informações primordiais, tais como: a legenda da classificação, isto é, a nomenclatura das classes e as respectivas descrições; os tipos de dados e as técnicas de extração de informação mais adequadas; e o método de análise da qualidade temática da informação representada.

A partir da definição da área de estudo, deve-se estabelecer o objetivo do mapeamento e então identificar quais classes serão mapeadas. Para tanto, foi definido, previamente o nível de detalhamento do mapeamento que se pretende considerar, priorizando, nesse caso, a extração de informações descritas no nível II do sistema hierárquico. Com isso, pôde-se identificar quais classes são encontradas na área de estudo, as quais especificaram a legenda da classificação e as respectivas descrições.

Do total de treze subclasses listadas no nível II do sistema (Tabela 1), oito puderam ser identificadas no município de Presidente Prudente, sendo estas:

- 1.1 *Edificação urbana / rural*: mancha urbana da cidade de Presidente Prudente e distritos;
- 1.2 *Malha viária*: vias de transporte rodoviário;
- 2.1 *Cultura agrícola*: área de cultivos permanente e temporário e área com solo preparado para o plantio;
- 2.2 *Pastagem*: área de pastagem cultivada utilizada pelo gado;
- 3.1 *Área úmida continental*: área úmida no entorno dos cursos d'água;
- 4.1 *Água continental*: curso d'água e corpos d'água naturais e artificiais;
- 5.1 *Formação florestal*: área de vegetação arbórea que compõe a Floresta Estacional Semidecidual remanescente;
- 6.1 *Área sem cobertura vegetal*: local com afloramento rochoso ou área degradada como, por exemplo, o lixão da cidade de Presidente Prudente.

Conhecendo-se as classes temáticas de interesse ao mapeamento, devem-se especificar os tipos de dados necessários à extração dessa informação. Conforme mencionado, imagens com resolução espacial entre 20 e 30 m devem ser satisfatórias à finalidade em questão, de modo que se optou por selecionar uma imagem Landsat-5, tomada pelo sensor TM (*Thematic Mapper*), de 30 m de resolução espacial. Essa imagem foi adquirida a partir do *site* do INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) (<http://www.dgi.inpe.br/CDSR/>), sendo tomada em setembro de 2007, referente à órbita/ponto 222/75.

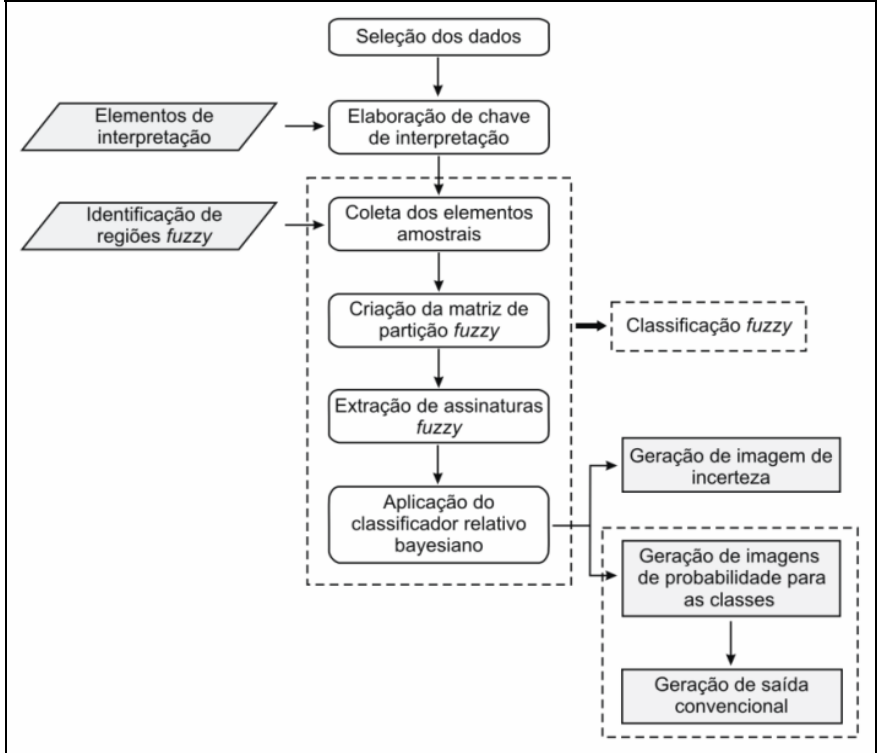
A técnica de classificação adotada deve considerar a ocorrência de *pixels* mistos e, portanto, baseada em abordagem *fuzzy*. Assim, a análise da qualidade da informação temática pode ser feita a partir de medidas de incerteza e dos coeficientes estatísticos convencionalmente utilizados (acurácia global e por classe).

### 5.3 Georreferenciamento e Classificação *Fuzzy*

Após a definição do sistema hierárquico e do projeto de classificação, foi realizado o georreferenciamento da imagem TM/Landsat-5. Para tanto, optou-se por utilizar o aplicativo SPRING, sendo adotado o sistema de projeção UTM (Universal Transversa de Mercator) e o datum SAD69 (*South American Datum* 1969). Nesse processo, uma base vetorial georreferenciada e cedida pela Prefeitura de Presidente Prudente foi adotada como informação de referência. Foram considerados 20 pontos identificados na base vetorial e na imagem TM e a precisão do georreferenciamento foi de 0,55 *pixel* (ou 16,5 metros).

Com a imagem georreferenciada, foi aplicada a técnica de classificação denominada relativa bayesiana, baseada na matriz de partição *fuzzy*. Essa técnica está implementada no aplicativo IDRISI e consiste nas etapas ilustradas no fluxograma apresentado na Figura 3.

Figura 3 - Fluxograma das etapas necessárias à classificação relativa bayesiana.



A primeira etapa da classificação envolveu a elaboração de uma chave de interpretação, a fim de caracterizar os alvos presentes na cena. Para tanto, foi selecionada uma coleção de imagens ilustrativas e feita a descrição das características de identificação desses alvos na imagem, baseando-se nos elementos de interpretação (cor, forma, textura, padrão, localização etc.).

Com base na chave de interpretação, foram coletadas as amostras de treinamento para as classes. Nesse processo, coletaram-se elementos amostrais nas regiões “intra-classes” (dentro das classes) e “entre classes” (de transição entre certas classes). Isso é necessário visto que *pixels* mistos podem ocorrer tanto no interior de classes, devido à resolução espacial do sensor, quanto nas bordas de classes, visto que a transição entre tipos de cobertura naturais é geralmente gradual.

Em seguida, foi criada a matriz de partição *fuzzy*, que indica os graus de pertinência de cada conjunto de amostras de treinamento para cada classe. Essa matriz é gerada na forma de uma tabela formada por  $N$  colunas (classes de cobertura da terra) e  $M$  linhas (conjuntos de treinamento), sendo apresentada na Tabela 3:

Tabela 3 - Matriz de partição *fuzzy*.

<i>M</i> \ <i>N</i>	<i>EUR</i>	<i>MV</i>	<i>CA</i>	<i>PT</i>	<i>AUC</i>	<i>AC</i>	<i>FF</i>	<i>ASV</i>
1	0,85	0,10	0	0	0	0	0	0,05
2	0	1	0	0	0	0	0	0
3	0	0	1	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0,86	0,06	0	0,08	0
5	0	0	0	0	0,80	0,14	0,06	0
6	0	0	0	0	0	1	0	0
7	0	0	0	0	0	0	1	0
8	0	0	0	0	0	0	0	1

onde: *EUR* = Edificação urbana / rural; *MV* = Malha viária; *CA* = Cultura agrícola; *PT* = Pastagem; *AUC* = Área úmida continental; *AC* = Água continental; *FF* = Formação florestal; e *ASV* = Área sem cobertura vegetal.

Dessa forma, para o conjunto das amostras coletadas para a classe 1 (*Edificação urbana / rural*), por exemplo, foi estimada uma proporção de 85% de ocorrência da classe propriamente dita; uma proporção de ocorrência da classe *MV* (*Malha viária*) equivalente a 10%; e, ainda, uma proporção de 5% para a classe *ASV* (*Área sem cobertura vegetal*). Essa estimativa é feita com base nos dados de treinamento coletados para cada classe e os graus de pertinência são atribuídos considerando o conhecimento que o analista tem de interpretação de imagem e da área mapeada. Quando nenhuma proporção de mistura é considerada dentro do conjunto de amostras de treinamento, o valor 1 é atribuído à classe, como, por exemplo, para a classe *AC* (*Água continental*).

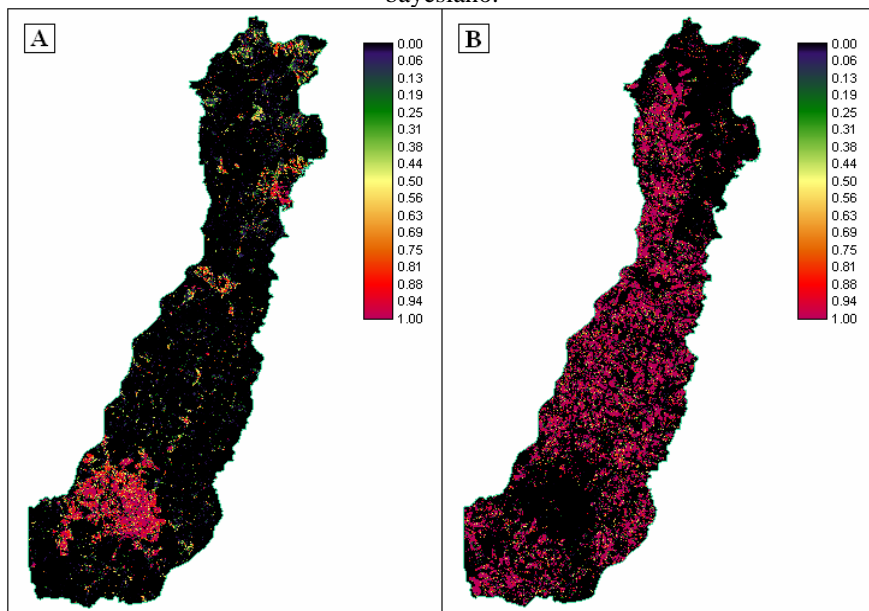
Posteriormente, foi realizada a extração de assinaturas *fuzzy* para as classes. Esse procedimento gera uma saída na qual é atribuído, a cada *pixel*, um peso proporcional ao seu grau de pertinência nas estimativas da média, variância e covariância de cada banda em relação a cada classe temática de interesse. Assim, um *pixel* que é, predominantemente, composto de *Formação florestal*, por exemplo, terá um grande peso na determinação da assinatura referente a essa classe, mas um peso baixo na determinação da assinatura para outras classes constituintes.

Em seguida pôde-se aplicar o classificador relativo bayesiano, sendo consideradas probabilidades *a priori* iguais para todas as classes. Como resultado do processamento, tem-se um conjunto de imagens (uma por classe) que expressa a probabilidade *a posteriori* dos *pixels* pertencerem a cada uma das classes de cobertura da terra, bem como uma imagem adicional que representa o grau de incerteza da classificação. Na Figura 4, por exemplo, são apresentadas as imagens de probabilidade *a posteriori* para as classes *Edificação urbana / rural* (A) e *Pastagem* (B). Conforme a escala de cores, verifica-se que a região nordeste do município tem pouca probabilidade de ser área edificada e de ser pastagem, visto



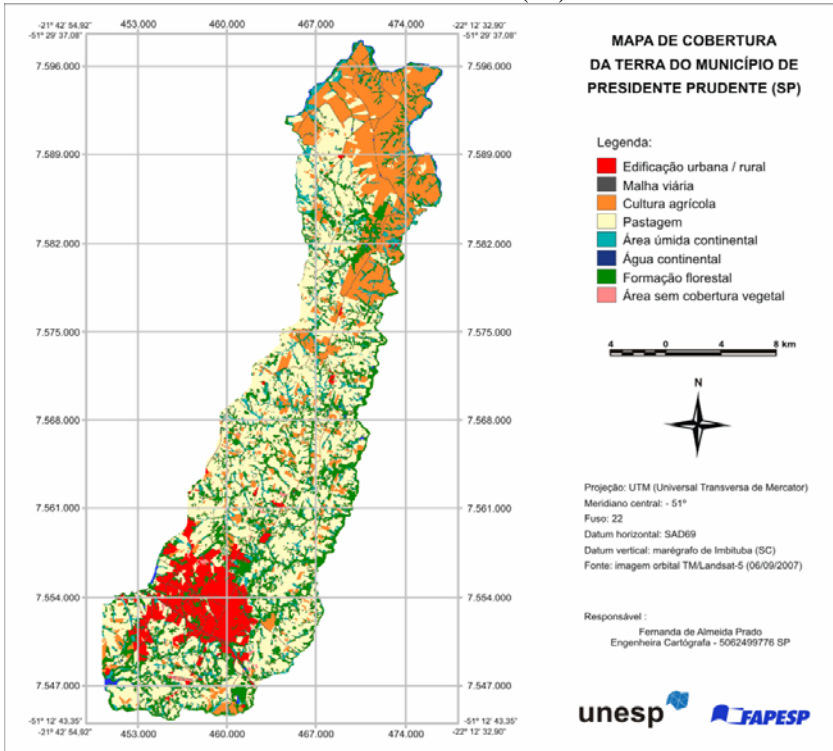
que ambas as imagens (A e B) forneceram baixa probabilidade *a posteriori* para os *pixels* neste local. Logo, esses *pixels* podem pertencer a qualquer uma das outras classes mapeadas (*Área úmida continental, Água continental, Formação florestal* etc.), devendo analisar suas imagens de probabilidade para identificar em qual(is) classe(s) os *pixels* apresentam maior probabilidade de pertencer. Além disso, no caso da imagem A, verifica-se a alta probabilidade *a posteriori* principalmente dos *pixels* representativos da mancha urbana, situada a sudoeste do município, o que, conseqüentemente, resultou em uma baixa probabilidade *a posteriori* no local, na imagem B. Por sua vez, em relação à imagem B, nota-se que grande parte da área do município apresenta alta probabilidade *a posteriori* de pertencer à classe *Pastagem*, o que faz com que, nas demais imagens de probabilidade, os *pixels* localizados nessas regiões apresentem menores probabilidades de pertencer.

Figura 4 - Imagens de probabilidade *a posteriori* para as classes *Edificação urbana / rural* (A) e *Pastagem* (B), fornecidas pelo classificador relativo bayesiano.



Finalmente, foi gerada uma saída rígida (convencional) para a classificação relativa. Ou seja, a partir das imagens de probabilidade *a posteriori* fornecidas para cada *pixel* em cada classe, gerou-se uma única imagem classificada atribuindo o *pixel* à classe na qual este apresenta maior probabilidade de pertencer (Figura 5), ignorando as demais proporções de contribuição de outras classes.

Figura 5 - Mapa temático de cobertura da terra do município de Presidente Prudente (SP).



#### 5.4 Análise da Confiabilidade do Mapeamento

A análise da confiabilidade do mapeamento foi feita inicialmente a partir do cálculo de coeficientes estatísticos. A realização dessa análise pressupõe a definição prévia de alguns parâmetros, tais como: esquema de amostragem; quantidade de elementos amostrais; tipo de unidade amostral; e informações de referência.

O esquema de amostragem selecionado foi o aleatório estratificado, que combina boa distribuição geográfica com menor potencial de tendência. O número de elementos amostrais ( $n_i$ ) foi estimado para cada classe considerando a distribuição binomial, dada por:

$$n_i = \frac{\chi^2_{(1,1-(\alpha/m))} p_i (1 - p_i)}{d_i^2}; \quad (6)$$

onde:  $\chi^2_{(1,1-(\alpha/m))}$  é o valor para o nível de confiança desejado ( $\alpha/m$ ) com 1 grau de liberdade e  $(1-\alpha/m)$ , considerando a distribuição qui-quadrado (nesse caso, tem-se  $\chi^2_{(1,0,99375)} = 7,476773$ ); o valor da precisão desejada ( $d_i$ ) foi assumido como 5% e as proporções representativas de cada classe ( $p_i$ ) foram estimadas a partir do resultado do mapeamento e são listadas na Tabela 4. Por exemplo, para a classe *Pastagem*, de maior representatividade na área de estudo, o número mínimo de amostras correspondeu a 90 e, para as demais classes, com menor proporção de ocorrência, os valores obtidos foram inferiores a este, totalizando 278 amostras. Além disso, a unidade amostral utilizada foi um conjunto de  $2 \times 2$  pixels e as informações de referência consideradas foram: o conhecimento da área de estudo; imagens de alta resolução espacial disponibilizadas pelo aplicativo *Google Earth*; e informações do projeto CANASAT ([www.dsr.inpe.br/mapdsr/](http://www.dsr.inpe.br/mapdsr/)) sobre a distribuição espacial da área cultivada com cana-de-açúcar no município.

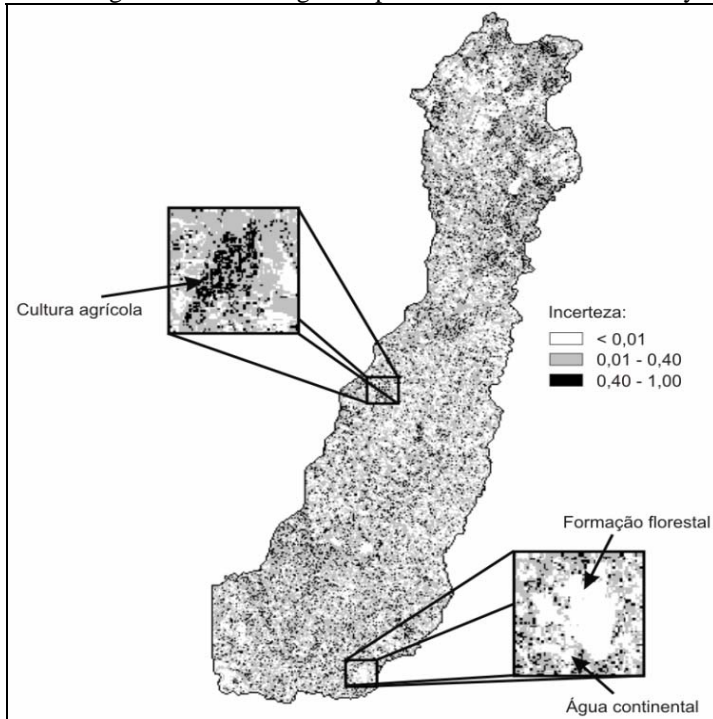
Tabela 4 - Proporção de ocorrência estimada para as classes mapeadas.

<i>Classe temática</i>	<i>Hectare (ha)</i>	<i>Porcentagem (%)</i>
Edificação urbana / rural	5.806	10,3
Malha viária	620	1,1
Cultura agrícola	11.725	20,8
Pastagem	22.100	39,2
Área úmida continental	4.228	7,5
Água continental	451	0,8
Formação florestal	11.275	20,0
Área sem cobertura vegetal	169	0,3
Total	56.374	100

Com isso, foram distribuídos aleatoriamente na imagem os 278 elementos amostrais e foi verificada a concordância entre a classe mapeada e a real ocorrência na superfície terrestre, com base nas informações de referência. A matriz de erros foi elaborada e foram estimados os valores da exatidão global e dos índices concordância *Tau* e *Kappa* (CONGALTON; GREEN, 1999), sendo correspondentes a 85,63%, 83,58% e 81,67%, respectivamente. Conforme esperado, a exatidão global tende a representar o valor máximo calculado, visto que considera apenas o percentual correto da matriz e superestima o resultado da classificação. Por outro lado, os coeficientes *Tau* e *Kappa* possuem maior consistência por considerarem para a obtenção do valor final, além do percentual de plena concordância, a proporção de concordância por casualidade. O valor intermediário de *Tau* indica um balanceamento entre os outros dois índices.

Dessa forma, os coeficientes estatísticos calculados permitiram uma análise global da qualidade do mapeamento. Por outro lado, para uma análise espacial da qualidade do resultado gerado, foram verificadas as medidas de incerteza fornecidas pelo classificador, através da imagem de incerteza (Figura 6), que aponta as regiões com maior e menor probabilidade de erro na atribuição dos *pixels* às classes. Conforme a escala de tons de cinza, pôde-se observar que houve um predomínio do tom cinza na maior parte da área de estudo, que indica uma incerteza variando entre 1% – 40%. Algumas regiões apresentaram incerteza, aproximadamente, nula, visto que os *pixels* correspondem a classes facilmente discrimináveis em relação às demais, tais como *Água continental* e *Formação florestal*, o que implica em altos graus de pertinência para esses *pixels* nas classes em questão e baixa (ou nula) pertinência nas demais. Por outro lado, determinadas regiões, com *pixels* de maior dificuldade de discriminação, apresentaram maior incerteza, como áreas de *Cultura agrícola*, por exemplo, as quais apresentam certos padrões de comportamento espectral semelhantes aos verificados para as classes *Área sem cobertura vegetal* e, principalmente, *Edificação urbana / rural*. Ambos os casos são ilustrados na Figura 6.

Figura 6 - Imagem de incerteza gerada pelo classificador relativo bayesiano.



## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A ausência de um sistema de classificação voltado para o mapeamento da cobertura da terra do território brasileiro foi um dos principais motivadores deste trabalho, juntamente com a escassez de propostas teóricas na literatura. O que se tem disponível é uma gama de sistemas propostos em diversos países que são específicos a determinadas necessidades de mapeamento, com poucas exceções e que não possibilitam a descrição da variedade de tipos de cobertura existentes.

Nesse contexto, o sistema proposto busca contribuir para uma padronização de classes de cobertura da terra, não apenas da nomenclatura, mas também dos critérios utilizados para descrevê-las. Isso poderá favorecer o intercâmbio de informações, bem como atualizações periódicas visto que, se a nomenclatura das classes e suas descrições são padronizadas, o risco da utilização de critérios distintos para os mapeamentos será minimizado.

Deve-se destacar também que o sistema proposto é útil a diversas aplicações e usuários por apresentar uma ampla variedade de classes dispostas em diferentes níveis hierárquicos de detalhamento. Conforme a necessidade do mapeamento, maior ou menor grau de detalhamento pode ser requerido, podendo-se optar por qualquer um dos níveis de detalhe propostos ou mesmo especificar outros níveis mais detalhados, por se tratar de um sistema flexível à incorporação de novas categorias.

Além de propor o sistema hierárquico de classificação, o mesmo também foi testado a partir da definição de um estudo de caso e foi possível constatar que o sistema supriu plenamente a necessidade do mapeamento. O uso da técnica de classificação baseada em abordagem *fuzzy* permitiu lidar melhor com a existência de *pixels* mistos na imagem orbital, decorrente da resolução espacial métrica do sensor. Essa é uma abordagem ainda pouco usual em mapeamentos temáticos, mas que, além de fornecer resultados mais adequados, também proporcionou a análise da incerteza incorporada ao processo de mapeamento, identificando as áreas com maior probabilidade de erro no processo de atribuição dos *pixels* às classes, informação que pode ser útil tanto ao analista quanto ao futuro usuário do mapa classificado.

## AGRADECIMENTOS

As autoras deste trabalho agradecem à FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo) pelo financiamento da pesquisa e aos Profs. Drs. Edson Eyji Sano e João Lima Sant'anna Neto, pelas relevantes contribuições para o desenvolvimento do sistema hierárquico de classificação.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDERSON, J. R.; HARDY, E. E.; ROACH, J. T.; WITMER, R. E. *A land use and land cover classification system for use with remote sensor data*. Geological Survey Professional Paper 964. Washington: USGS, 1976.

- CONGALTON, R. G.; GREEN, K. *Assessing the accuracy of remotely sensed data: principles and practices*. New York: Lewis Publishers, 1999.
- DI GREGORIO, A. *Land cover classification system (LCCS), version 2: classification concepts and user manual*. Rome: FAO, 2004.
- EASTMAN, J. R.; LANEY, R. M. Bayesian soft classification for sub-pixel analysis: a critical evaluation. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, v. 68, n. 11, p. 1149-1154, 2002.
- EEA – EUROPEAN ENVIRONMENTAL AGENCY. *CORINE land cover – part 1: methodology*. Bruxelas: EEA, 1995. Disponível em: <<http://reports.eea.eu.int>>. Acesso em: 13 jan. 2008.
- EC – EUROPEAN COMMISSION. *LUCAS 2006 (Land use / cover area frame survey) – Technical reference document C-3: nomenclature*. 2006.
- FOODY, G. M.; LUCAS, R. M.; CURRAN, P. J.; HONZAK, M. Non-linear mixture modelling without end-members using an artificial neural network. *International Journal of Remote Sensing*, v. 18, n. 4, p. 937-953, 1997.
- FOODY, G. M. The continuum of classification fuzziness in thematic mapping. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, v. 65, n. 4, p. 443-451, 1999.
- GORHAM, B. *Final report: the 1999 Arkansas land-use / land-cover project*. 1999.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). *Manual técnico da vegetação brasileira*. Manuais Técnicos em Geociências, n. 1. Rio de Janeiro: IBGE, 1992.
- \_\_\_\_\_. *Manual técnico de uso da terra*. Manuais Técnicos em Geociências, n. 7. Rio de Janeiro: IBGE, 1999.
- \_\_\_\_\_. *Manual técnico de uso da terra*. Manuais Técnicos em Geociências, n. 7. 2. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2006.
- LIMA JR., O. S. *Análise de pontos por função fuzzy*. 2002. 166 f. Dissertação (Mestrado em Informática Aplicada) – Fundação Educacional Edson Queiroz, Universidade de Fortaleza, Fortaleza.
- MASELLI, F.; RODOLFI, A.; CONESE, C. Fuzzy classification of spatially degraded Thematic Mapper data for the estimation of sub-pixel components. *International Journal of Remote Sensing*, v. 17, n. 3, p. 537-551, 1996.
- MDNR – MICHIGAN DEPARTMENT OF NATURAL RESOURCES. *Michigan land cover/use classification system – 2000*. 2001.
- OMNR – ONTARIO MINISTRY OF NATURAL RESOURCES. *Ontario land cover data base: user's manual*. Canada: OMNR, 1999.
- PRADO, F. A. *Sistema hierárquico de classificação para mapeamento da cobertura da terra nas escalas regional e urbana*. 2009. 168 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.

- WANG, F. Fuzzy supervised classification of remote sensing images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 28, n. 2, p. 194-201, 1990.
- ZADEH, L. A. Fuzzy sets. *Information and Control*, v. 8, p. 339-353, 1965.
- ZHANG, J; STUART, N. Fuzzy methods for categorical mapping with image-based land cover data. *International Journal Geographical Information Science*, v. 15, n. 2, p. 175-195, 2001.

(Recebido em maio de 2009. Aceito em dezembro de 2009).